Bipolaire transistor karakteristieken

Iedere bipolaire transistor wordt beschreven door zijn karakteristieken. Dat is een set van vier grafieken die het verband tussen de transistor-spanningen en -stromen vastlegt. Uit deze grafieken worden de parameters van de halfgeleider afgeleid.

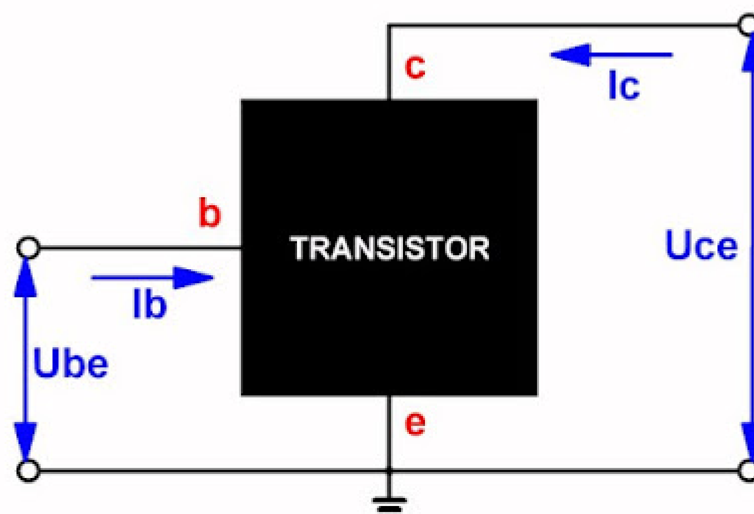
Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 16-05-2023

Inleidende begrippen

Bipolaire of BJT transistoren
In dit artikel worden de karakteristieken van bipolaire transistoren besproken. Dat zijn de bekende NPN- of PNP-halfgeleiders die een basis, een emitter en een collector hebben. Dit artikel geldt dus niet voor veldeffect transistoren, die hebben andere karakteristieken.
In het Engels worden deze transistoren '*BJT*' genoemd, letterwoord voor '***B****ipolar* ***J****unction* ***T****ransistor*'.

NPN- of PNP-transistoren
In dit artikel worden de karakteristieken behandeld aan de hand van het voorbeeld van een NPN-transistor. De karakteristieken van een PNP-transistor zijn identiek, u moet alleen de polariteit van de spanningen en de richting van de stromen omkeren.

Algemene voorstelling van een NPN-transistortrap
U kunt een schakeling rond een NPN-transistor volgens de onderstaande figuur voorstellen door een '*zwart doosje*' met één ingang en één uitgang. De ingang wordt gestuurd met een basisstroom I_b, waardoor er tussen de ingang en de massa een ingangsspanning U_{be} ontstaat. De ingangsstroom vloeit naar de transistor. De ingangsstroom heeft tot gevolg dat er ook een collectorstroom I_c gaat vloeien. Ook deze uitgangsstroom vloeit naar de transistor. Het gevolg is dat er tussen de collector en de emitter een uitgangsspanning ontstaat, die men U_{ce} noemt.

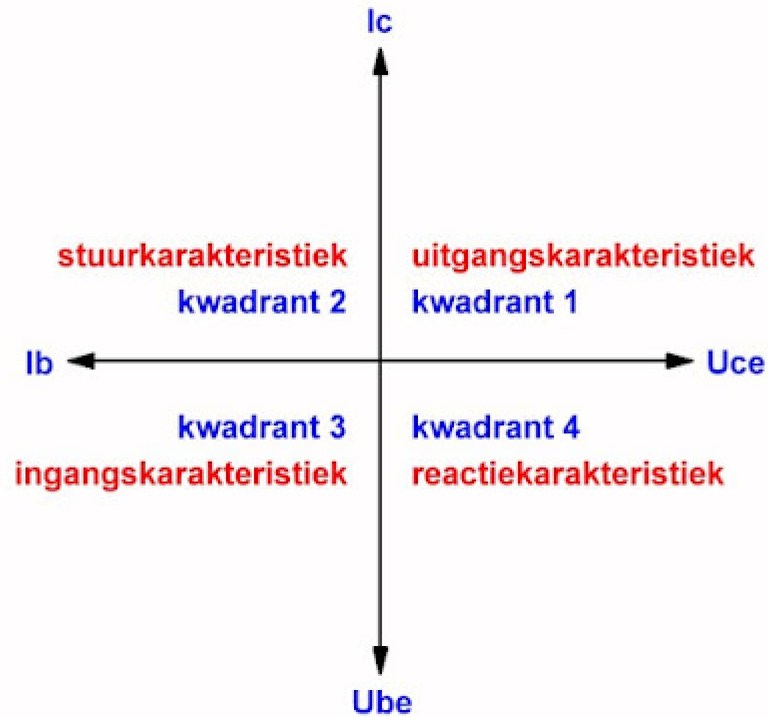


Afspraken
Bij het benoemen van spanningen in dit soort schema's wordt van de volgende afspraak uitgegaan. U moet een spanning uiteraard steeds meten tussen twee punten. Bovendien maakt het uit welk punt u als referentie beschouwt. Dit punt wordt met de '*COM*' van uw multimeter verbonden. U moet dus aangegeven welk punt het meetpunt en welk punt de referentie is. Als u het hebt over de spanning U_{ce}, dan duidt de eerste kleine letter c het meetpunt aan en de tweede kleine letter e de referentie. In dit geval wordt dus de collectorspanning gemeten en de emitterspanning verbonden met de '*COM*' van de meter.
Een tweede afspraak is de manier waarop men de karakteristieken benoemd. Een van de karakteristieken, zo zal dadelijk blijken, geeft het verband tussen de collectorstroom I_c en de collector/emitter-spanning U_{ce}. Men schrijft dat als $I_c = f(U_{ce})$. Dat is de notatie voor de karakteristiek die het verloop van de collectorstroom I_c geeft in **functie** van de collector/emitter-spanning U_{ce}.

Niet lineair gedrag
Tussen de vier gedefinieerde grootheden I_b, U_{be}, I_c en U_{ce} bestaan bepaalde relaties. Een verandering van de ene grootheid heeft onmiddellijk veranderingen van minstens één andere grootheid tot gevolg. Bovendien is een transistor een niet lineair element. Het verband tussen spanning en stroom voldoet niet aan de wet van Ohm ($U = I \bullet R$). Een verdubbeling van de stroom I heeft niet een verdubbeling van de spanning U tot gevolg.
Toch is het zeer belangrijk om de onderlinge relatie tussen de vier grootheden te kennen. Aan de hand van die wetenschap kunt u immers de transistortrap berekenen, hetgeen wil zeggen dat u de basis-, collector- en eventueel emitterweerstanden kunt berekenen om een bepaalde stroom en een bepaalde spanning aan de uitgang te verkrijgen.

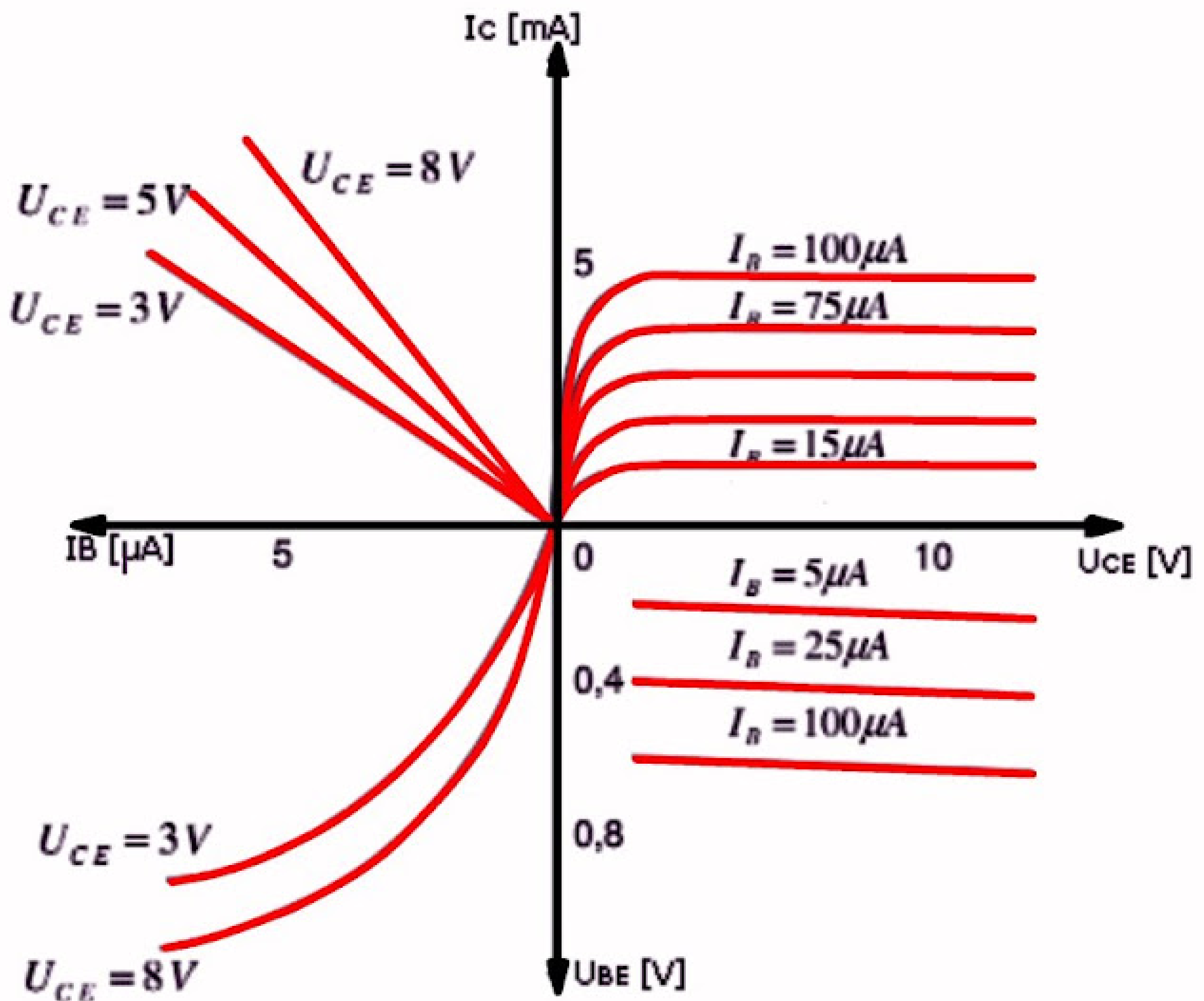
Karakteristieken
Het niet lineaire gedrag van een transistor kan uitstekend in een paar wiskundige formules beschreven worden. Die formules zijn echter zeer ingewikkeld en vandaar alleen maar bruikbaar om studenten lastig mee te vallen. Bij het ontwerpen van transistorschakelingen hebt u er echter niets aan. Vandaar dat de wiskundige formules steeds worden vertaald naar grafieken. Iedere grafiek geeft het verband weer tussen twee van de vier besproken grootheden. Dit noemt men de '*karakteristieken van de bipolaire transistor*'.
De vier karakteristieken geven:
- Het verband tussen I_c en U_{ce} (kwadrant 1)
- Het verband tussen I_c en I_b (kwadrant 2)
- Het verband tussen U_{be} en I_b (kwadrant 3)
- Het verband tussen U_{be} en U_{ce} (kwadrant 4)

De vier karakteristieken hebben dus assen gemeen. Vandaar dat u de karakteristieken niet afzonderlijke moet tekenen. U kunt de vier grafieken samenvatten in het assenstelsel van de onderstaande figuur. In de figuur staat aangegeven welke assen gebruikt worden voor het definiëren van welke grootheden. Dit is een standaard indeling, die door iedere transistorfabrikant wordt gevolgd. In het rood is de benaming van de vier karakteristieken weergegeven.



De vier transistor karakteristieken in één assenstelsel.
(© 2023 Jos Verstraten)

De karakteristieken-bundels
In de onderstaande figuur zijn als voorbeeld de karakteristieken van een bepaalde transistor getekend. Hieruit blijkt dat iedere karakteristiek uit meer dan een curve bestaat.
In de $I_c = f(U_{ce})$ karakteristiek zijn bijvoorbeeld vijf curves getekend. Iedere curve komt overeen met een bepaalde basisstroom I_b. Deze beïnvloeding van de twee uitgangsgrootheden I_c en U_{ce} door de ingangsgrootheid I_b wordt veroorzaakt door interne terugkoppelingen in de transistor. Dat is een gevolg van ingewikkelde natuurkundige verschijnselen in het halfgeleiderkristal, waarvan de verklaring heel diep in de vaste-stof fysica verborgen zit en ver buiten de opzet van dit artikel ligt.



De karakteristieken van een bepaalde transistor. (© 2023 Jos Verstraten)

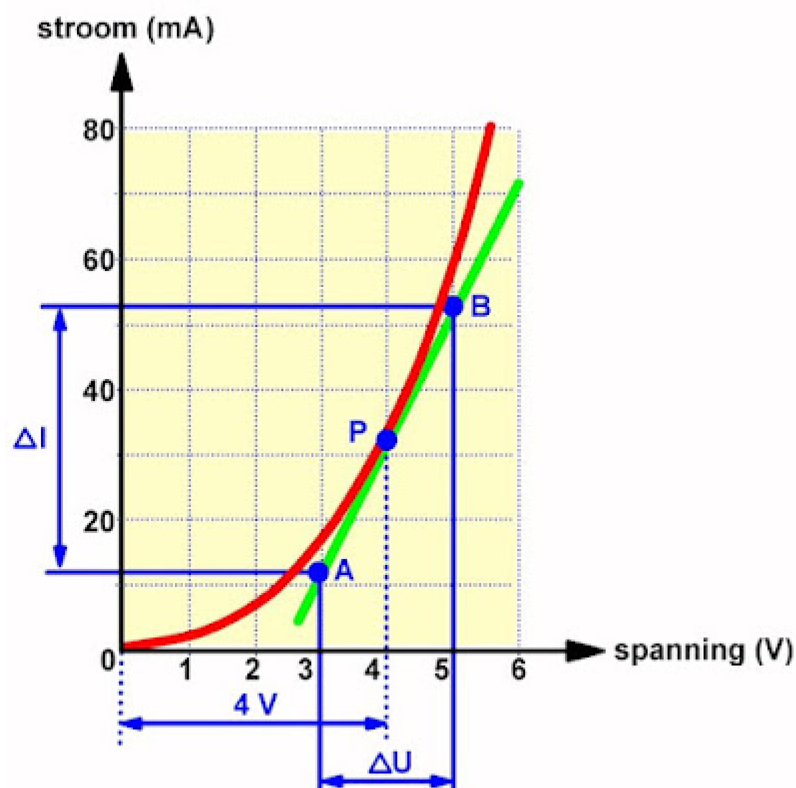
Van karakteristieken naar parameters
Transistoren hebben bepaalde karakteristieke eigenschappen, zoals stroomversterkingen, ingangs- en uitgangsweerstanden. Dit noemt men de '*parameters*' van de halfgeleiders. Deze parameters kunt u op een eenvoudige manier afleiden uit de karakteristieken van de transistor.

Grafisch bepalen van weerstanden

Statische en dynamische weerstanden
Tot de belangrijkste eigenschappen van iedere transistor behoren zonder meer de ingangs- en de uitgangsweerstand. Deze worden respectievelijk R_{be} en R_{ce} genoemd. Nu is het zo dat dit geen constante weerstanden zijn. Dat is een rechtstreeks gevolg van de niet lineaire karakteristieken van een transistor. U kunt dus niet spreken van dé ingangsweerstand, maar van de ingangsweerstand bij een bepaalde in- of uitgangsstroom. U kunt deze weerstanden dus niet met een universeelmeter meten.
Bovendien is men niet erg geïnteresseerd in de weerstandswaarden als men de transistor stuurt met een gelijkstroom. In de praktijk moet de halfgeleider immers wisselspanningen versterken. Het gevolg is dat er wisselstromen door de transistor vloeien. De interessante waarden van de weerstanden zijn nu net deze, die ontstaan als er wisselstromen door de transistor vloeien.
Een wisselstroom is op te vatten als een schommeling rond een gemiddelde waarde. De stroom neemt eerst af en daarna weer toe. Dat is een dynamisch verschijnsel, in tegenstelling tot het vloeien van een constante gelijkstroom dat een statisch verschijnsel is. Vandaar dat

men de gezochte weerstanden '*dynamische weerstanden*' noemt. Deze worden voorgesteld door de symbolen r_{be} en r_{ce}. De kleine letters r duiden er op dat dit weerstanden zijn die gemeten kunnen worden als de transistor wisselstromen verwerkt. De weerstanden die optreden bij een constante gelijkstroom noemt men de '*statische weerstanden*' en deze worden voorgesteld met een hoofdletter R: R_{be} en R_{ce}.

Bepalen van de waarde van de dynamische weerstanden
Het is niet zo gemakkelijk om de dynamische weerstanden experimenteel te bepalen.
Maar als u de karakteristieken van de transistor kent, kunt u op een heel eenvoudige grafische manier deze weerstanden voor ieder punt van de karakteristiek bepalen. Hoe dat gebeurt is geschetst in de onderstaande figuur. In deze grafiek is het verband getekend tussen de spanning over een onderdeel en de stroom die door dit onderdeel vloeit. Zoals blijkt uit de rode grafiek is dit verband niet lineair. Nu weet u uit de wet van Ohm dat het verband tussen spanning en stroom overeen komt met de weerstand. Immers: R = U / I, weerstand is spanning gedeeld door stroom. De vorm van de grafiek geeft dus in feite het verloop weer van de weerstand bij variërende stroom en spanning door en over het onderdeel.
Stel dat u de dynamische weerstand wilt bepalen in het punt P, als de gemiddelde spanning over de weerstand gelijk is aan 4 V.
U trekt als eerste handeling de raaklijn aan de grafiek in het punt P. Dat is een lijn (groen) die de curve alleen in het punt P raakt en verder nergens.
Vervolgens neemt u een klein spanningsverschil (in dit geval 1 V) en trekt dit af respectievelijk telt het op bij de spanning in punt P. In het voorbeeld krijgt u dus spanningen van 3 V en van 5 V. Dit spanningsbereik van 3 V tot 5 V noemt men, als gevolg van een wiskundige afspraak, ΔU. Dit wordt uitgesproken als '*delta-U*' en hiermee wordt in het algemeen een klein spanningsverschil aangegeven.
Dit spanningsverschil ΔU komt overeen met een bepaald stroomverschil ΔI. Dit kunt u uit de grafiek aflezen door de snijpunten te bepalen van de verticale lijnen bij 3 V en bij 5 V met de raaklijn. Dat zijn de punten A en B. Uit deze punten trekt u horizontale lijnen naar de stroom-as, leest de stromen af en berekent ΔI als het verschil tussen de stroom in punt B en de stroom in punt A.



Bepalen van de waarde van een dynamische weerstand.
(© 2023 Jos Verstraten)

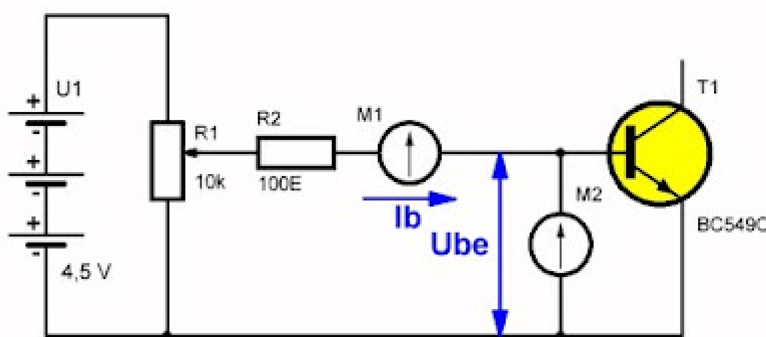
Als de spanning over het onderdeel met een bedrag ΔU varieert, zal de stroom door het

onderdeel met een bedrag ΔI variëren. Door deze spanning te delen door de stroom krijgt u, geheel volgens de wet van ohm, de dynamische weerstand voor het punt P:
$r = \Delta U / \Delta I$
De statische weerstand voor elk punt van de grafiek is natuurlijk te berekenen door de spanning die met dit punt overeen komt te delen door de stroom bij dat punt:
$R = U / I$
Op deze manier kunt u uit de karakteristieken van een transistor de statische en dynamische ingangs- en uitgangsweerstanden bepalen.

Opmerking
In dit voorbeeld wordt gewerkt met een ΔU van 2 V, dit om de werkwijze goed zichtbaar te maken op de afbeelding. In de praktijk moet u natuurlijk met veel lagere waarden voor ΔU werken.

De I_b = f (U_{be}) karakteristiek

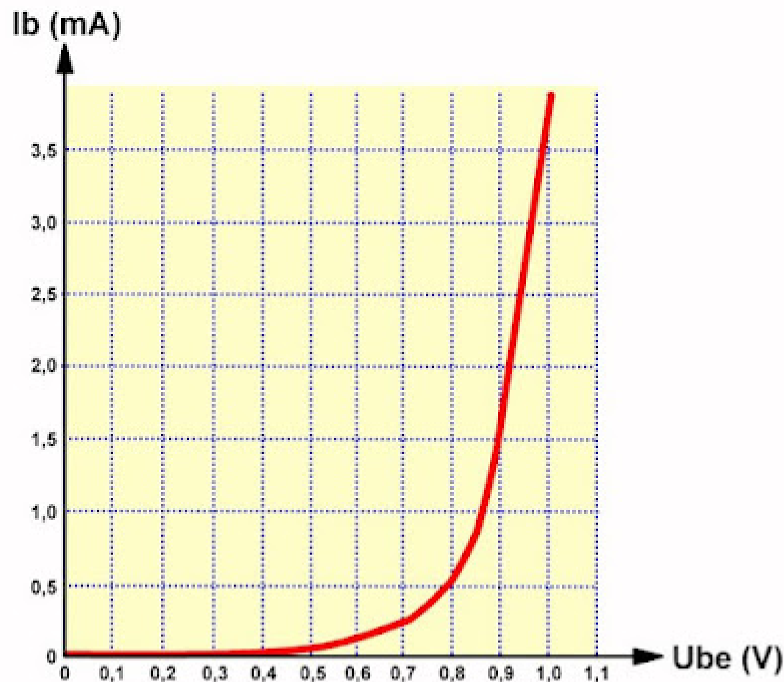
Meten van deze karakteristiek
Deze karakteristiek, die de ingangskarakteristiek wordt genoemd, kunt u opmeten aan de hand van de meetopstelling van de onderstaande figuur. Over een batterijtje met spanning U1 wordt een potentiometer R1 geschakeld. Op de loper kunt u dus een regelbare spanning aftakken. De loper gaat via een beveiligingsweeerstand R2 en een milli-ampèremeter M1 naar de basis van de transistor. De basis/emitter-spanning U_{be} wordt gemeten met de voltmeter M2.
De meting gaat als volgt. U stelt de spanning op M2 in op bijvoorbeeld 0,1 V. U meet de bijbehorende basisstroom I_b. Deze stroom zal heel klein zijn, misschien moet u de meter wel overschakelen naar µA. Vervolgens laat u de spanning in stappen van 0,1 V stijgen en meet steeds de stroom. In het begin zal de stroom nauwelijks groter worden. Maar bij een spanning van ongeveer 0,5 V ziet u dat de stroom meetbaar begint te stijgen. Misschien moet u dan zelfs gaan meten met stapjes van 0,01 V in plaats van 0,1 V. Het handigst is de meetresultaten op te schrijven onder de vorm van een tabel met twee kolommen U_{be} en I_b. Iedere meting vormt dan een rij in deze tabel.
Op een bepaald moment zult u merken dat de basisstroom flink gaat stijgen. U moet dan uiteraard de meting stop zetten, omdat de transistor kan worden beschadigd.



meting	Ube	Ib
meting-1	 V	..... mA
meting-2	 V	..... mA
meting-3	 V	..... mA
⋮	⋮	⋮
meting-8	 V	..... mA
meting-9	 V	..... mA

Meten van de ingangskarakteristiek. (© 2023 Jos Verstraten)

Tekenen van de ingangskarakteristiek
U hebt nu een aantal meetparen die ieder bestaan uit een spanning en een stroom. Deze kunt u in grafiek uitzetten met een stroom-as en een spanning-as. Het gevolg zal er ongeveer uitzien als getekend in de onderstaande figuur.

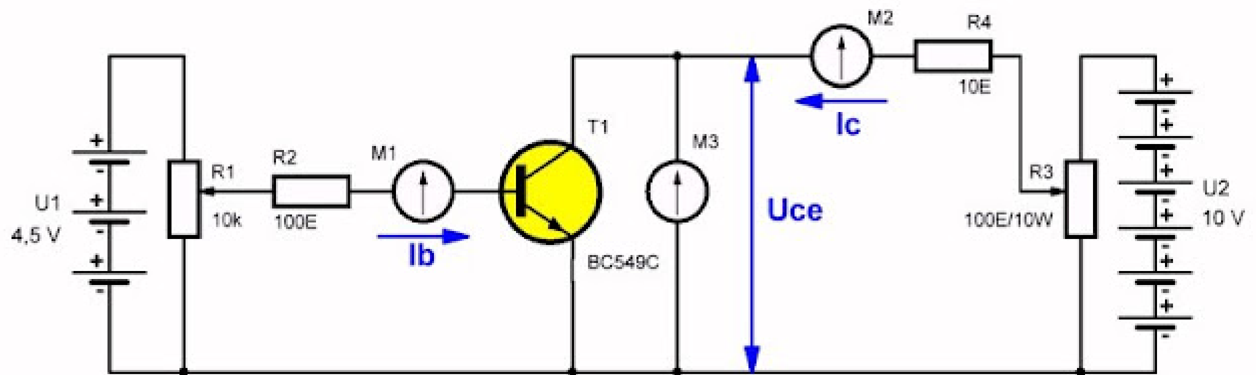


Het tekenen van de ingangskarakteristiek.
(© 2023 Jos Verstraten)

De r_{be} grafisch bepalen
Uit de ingangskarakteristiek kunt u, op de beschreven raaklijn manier, de dynamische ingangsweerstand r_{be} van de transistor in verschillende punten bepalen. De meeste transistoren hebben dynamische weerstanden die variëren tussen 50 Ω en 50 kΩ.
U kunt dus besluiten dat een transistor een zeer kleine weerstand te bieden heeft aan de te versterken signaalspanning. De halfgeleider vraagt dus een flinke stroom van het ingangssignaal. Vandaar dat men dan ook zegt dat een bipolaire transistor stroom gestuurd is en niet spanning gestuurd.

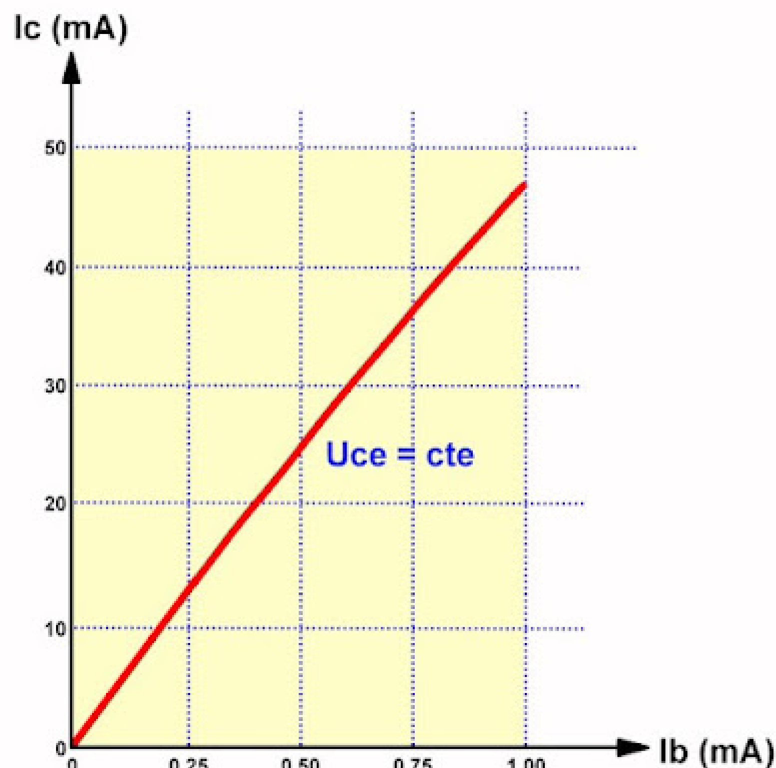
De Ic = f (Ib) karakteristiek

Meten van deze karakteristiek
Deze stuurkarakteristiek is een zeer belangrijke curve, omdat u hieruit de statische en dynamische stroomversterkingen van de transistortrap kunt afleiden. De verhouding tussen I_b en I_c geeft immers de verhouding tussen de stroom die u in de basis stuurt en de stroom die als gevolg daarvan naar de collector gaat stromen.
Voor het opstellen van de stuurkarakteristiek kunt u gebruik maken van de meetopstelling van de onderstaande figuur. Tussen de basis en de emitter wordt weer een instelbare spanningsbron aangesloten, voorgesteld door de potentiometer R1 die aangesloten is op een batterij U1. Hetzelfde geldt voor de collector/emitter-kring met potentiometer R3 en batterij U2. De spanning tussen de collector en de emitter wordt gemeten met de voltmeter M3. Bij het meten van deze grafiek is het namelijk zeer belangrijk dat dit gebeurt bij een constante collector/emitter-spanning! Zowel de basis- als de collectorstromen worden gemeten de mA-meters M1 en M2.
U begint de meting met de potentiometer R1 zó in te stellen dat er een bepaalde kleine stroom, stel 10 µA, in de basis vloeit. U verdraait vervolgens R2 tot de spanning U_{ce} tussen collector en emitter gelijk is aan de waarde waarbij u de karakteristiek wilt opstellen. Dat leest u af op de voltmeter M3. Vervolgens leest u de collectorstroom af op M2. Deze stappen herhaalt u voor verschillende waarden van de basisstroom. Iedere keer moet u de U_{ce} op de constante waarde instellen.
U maakt weet een tabelletje waarin u de waarden van I_b en I_c vermeldt.



Meetopstelling voor het meten van de stuurkarakteristiek. (© 2023 Jos Verstraten)

Tekenen van de stuurkarakteristiek
U kunt nu op de reeds bij de ingangskarakteristiek beschreven manier de meetparen uit de tabel omzetten in een grafiek. Het resultaat zal er uitzien zoals voorgesteld in de onderstaande figuur. De curve verloopt niet geheel lineair, waaruit u kunt afleiden dat ook de stroomversterking van een transistor geen constante waarde heeft.

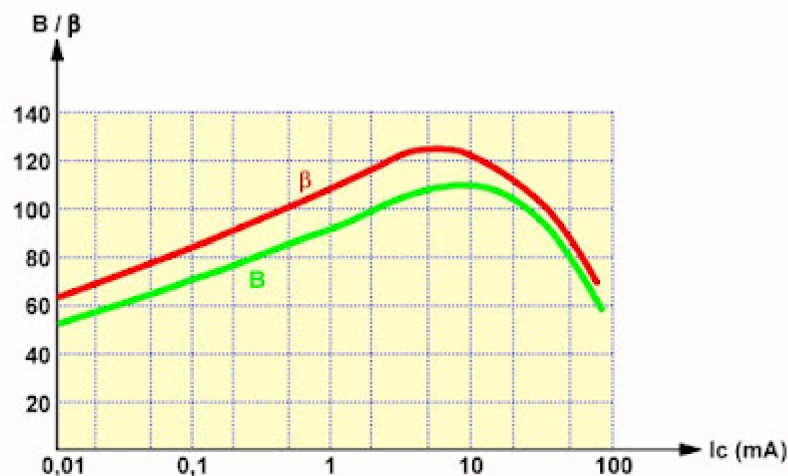


Voorbeeld van een gemeten stuurkarakteristiek.
(© 2023 Jos Verstraten)

Bepalen van de stroomversterkingen B en β
De statische stroomversterking van een transistor wordt voorgesteld door B. Deze kunt u bepalen door voor ieder punt van de curve de collectorstroom te delen door de basisstroom:
$B = I_c / I_b$
De dynamische stroomversterking kunt u men op de reeds beschreven raaklijn-methode bepalen. Deze stroomversterking wordt β genoemd. Dit is een Griekse letter die als '*bèta*' wordt uitgesproken. Het zal duidelijk zijn dat deze stroomversterking wordt uitgedrukt door de formule:
$\beta = \Delta I_c / \Delta I_b$

B en β in functie van de collectorstroom
Het is van belang het verloop van beide stroomversterkingen B en β in functie van de collectorstroom in een grafiek samen te vatten. In de meeste gevallen ziet deze karakteristiek

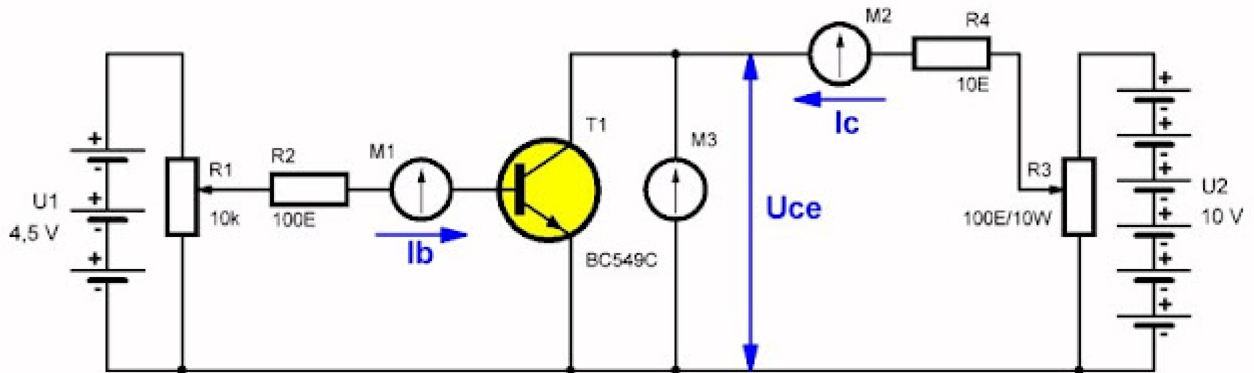
er uit zoals getekend in de onderstaande figuur.
Let er op dat de stroom-as niet lineair is ingedeeld, maar logaritmisch. Uit deze grafiek kunt u vaststellen dat, bij deze transistor, de versterkingsfactoren B en β het grootst zijn voor collectorstromen rond tien mA. Voor kleine stromen kan de waarde van de versterking tot meer dan de helft van de maximale waarde dalen. Datzelfde geldt in nog sterkere mate voor grote stromen. Bij een collectorstroom van 5 A kan de stroomversterking van een transistor gedaald zijn tot minder dan tien! Vandaar dat eindtransistoren, die flinke collectorstromen moeten verwerken (lineaire voedingen en audio-eindtrappen) vrijwel nooit in hun eentje staan. Voor de eigenlijke eindtransistoren staan drivertransistoren, die flinke basisstromen in de eindtransistoren kunnen pompen. Deze grote basisstromen zijn uiteraard noodzakelijk vanwege de kleine stroomversterking bij grote collectorstromen.



Variatie van B en β in functie van de collectorstroom.
(© 2023 Jos Verstraten)

De $I_c = f(U_{ce})$ karakteristiek

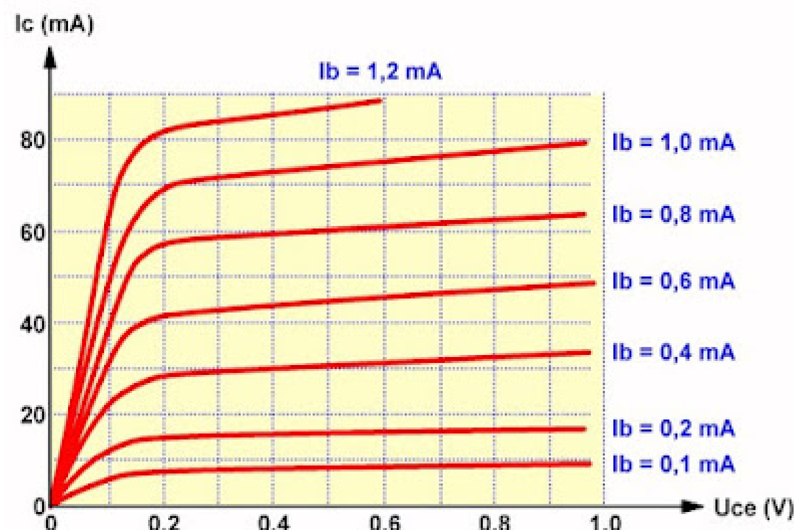
Meten van deze karakterisitiek
Deze karakteristiek wordt de uitgangskarakteristiek van de halfgeleider genoemd. Ook dat is een zeer belangrijke karakteristiek omdat u deze gebruikt voor het instellen van een transistortrap.
De uitgangskarakteristiek wordt gemeten met de meetschakeling van de onderstaande figuur.
Omdat de uitgangskarakteristiek in hoge mate afhankelijk is van de basisstroom, moet u in ieder geval een aantal karakteristieken opmeten, ieder bij een bepaalde constante basisstroom. Vandaar dat de basis via een beveiligingsweerstand R1 wordt aangesloten op een regelbare voeding via R1. Hetzelfde gebeurt met de collector. In de basis en de collector worden stroommeters M1 en M2 opgenomen. Tussen de collector en de emitter wordt een spanningsmeter M3 geschakeld.
U verdraait nu R1 tot de basisstroom de gewenste waarde heeft bereikt. Vervolgens verdraait u met R3 de voeding aan de uitgang tot de collector/emitter-spanning gelijk is aan 0,1 V. U noteert deze waarde weer in een tabel, samen met de op dat moment vloeiende collectorstroom (M2). U herhaalt nu de meting voor een U_{ce} van 0,2 V. Uiteraard moet u de basisstroom op de constante waarde houden!



Meetopstelling voor het meten van de uitgangskarakteristiek. (© 2023 Jos Verstraten)

U herhaalt deze metingen per 100 mV stijging van U_{ce} tot u merkt dat de collectorstroom niet erg stijgt. U kunt dan nog enige punten meten met verder uit elkaar liggende U_{ce}'s, bijvoorbeeld om de volt. Vervolgens worden de metingen herhaald met een andere constante basis-stroom.

Tekenen van de uitgangskarakteristiek
U kunt nu weer de meetresultaten uit de tabellen overzetten naar een U/I-assenstelsel. Het resultaat is geschetst in de onderstaande figuur. Opmerkenswaard is dat de uitgangskarakteristiek van een bipolaire transistor veel gelijkenis vertoont met deze van een triode-buis, maar ook met deze van een FET. Vandaar dat het ontwerpen van versterkertrappen met bipolaire transistoren, met triode-buizen en FET's in grote lijnen op dezelfde manier gaat en de schakelingen in feite identiek zijn.



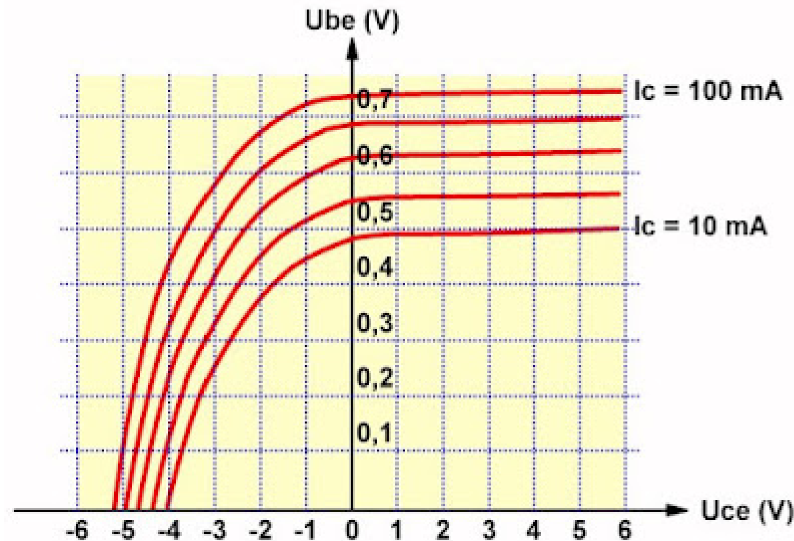
De uitgangskarakteristiek van een bipolaire transistor.
(© 2023 Jos Verstraten)

De statische en dynamische uitgangsweerstand
Uit de uitgangskarakteristiek kunt u uiteraard de statische en dynamische uitgangsweerstand R_{ce} en r_{ce} van de transistor op de reeds beschreven raaklijn-manier berekenen.
U zult dan vaststellen dat deze waarde sterk varieert in functie van de U_{ce} en wel tussen ongeveer 50 Ω en 50 kΩ. Het platte deel van de karakteristieken komt overeen met een vrijwel constante uitgangsweerstand.

De U_{be} = f (U_{ce}) karakteristiek

Niet zo'n belangrijke karakteristiek
Deze karakteristiek, die men de reactiekarakteristiek noemt, is de minst belangrijke.

In de meeste gevallen wordt deze niet eens gemeten. De grafiek is erg afhankelijk van de collectorstroom zodat, als u deze tóch meet, u minstens tien curves moet meten voor tien verschillende constante collectorstromen.
Het typische verloop van de karakteristiek is getekend in de onderstaande figuur.
Merk op dat de karakteristiek niet door de nul gaat als U_{ce} gelijk is aan nul! U moet U_{ce} ompolen om U_{be} op nul te krijgen. In de voorstelling waarin alle vier de karakteristieken in één assenstelsel worden samengevat (zoals getekend in de inleiding van dit artikel) wordt alleen het positieve deel van de grafiek weergegeven.



De reactiekarakteristiek van een bipolaire transistor.
(© 2023 Jos Verstraten)

Overige parameters van een bipolaire transistor

Inleiding
Uit de gemeten en grafisch voorgestelde karakteristieken van een bipolaire transistor hebt u belangrijke parameters va een bipolaire transistor kunnen afleiden:
- De statische ingangsweerstand R_{be}
- De dynamische ingangsweerstand r_{be}
- De statische stroomversterking B
- De dynamische stroomversterking β
- De statische uitgangsweerstand R_{ce}
- De dynamische uitgangsweerstand r_{ce}

Een bipolaire transistor heeft echter ook nog parameters die u niet uit de karakteristieken kunt afleiden:
- De lekstromen
- De parasitaire capaciteiten
- De schakelkarakteristiek
- De grensfrequentie
- De lijn van maximaal vermogen

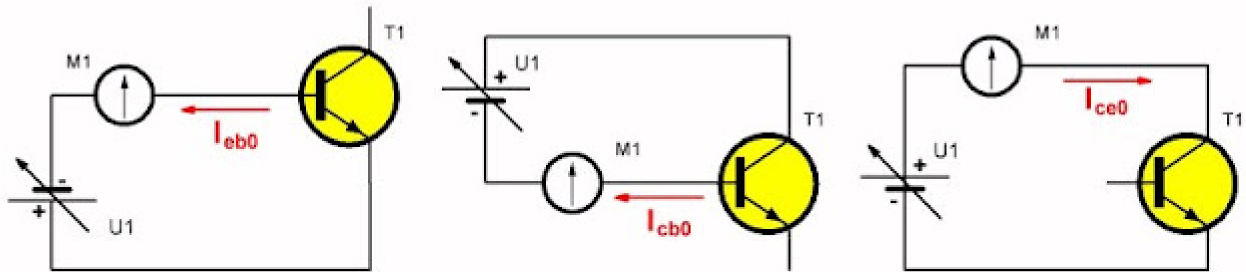
Deze eigenschappen worden nu in het kort besproken.

De lekstromen
Bij een NPN-transistor vloeit de basis/emitter-stroom I_{be} naar de basis toe. Als u echter de basis negatief maakt ten opzichte van de emitter, dan zult u merken dat er een kleine inverse stroom uit de basis vloeit. Deze stroom noemt men de '*basislekstroom*' van de transistor. Om het verschil met de normale basisstroom aan te geven wordt de lekstroom met het symbool I_{be0} aangeduid.
Hetzelfde verhaal geldt voor de collector/basis-stroom. Als u de bijbehorende aansluitingen van de transistor op een inverse spanning aansluit, zult u vaststellen dat er toch een kleine

stroom gaat vloeien, de I_{cb0}.
Als u tot slot een spanning in de juiste polariteit tussen de collector en de emitter zet, maar de basis open laat, zult u merken dat er tóch een kleine stroom door de transistor vloeit. Dit is de lekstroom tussen collector en emitter I_{ce0}.
Een transistor heeft dus drie lekstromen:

- I_{eb0}: de lekstroom tussen emitter en basis
- I_{cb0}: de lekstroom tussen collector en basis
- I_{ce0}: de lekstroom tussen collector en emitter

Deze lekstromen kunt u meten met de meetopstellingen die in de onderstaande figuur zijn voorgesteld. U sluit steeds de serieschakeling van een µA-meter M1 en een instelbare voeding U1 aan tussen de twee transistoraansluitingen waarvan u de lekstroom wilt meten. Let op de polariteit van de voeding!



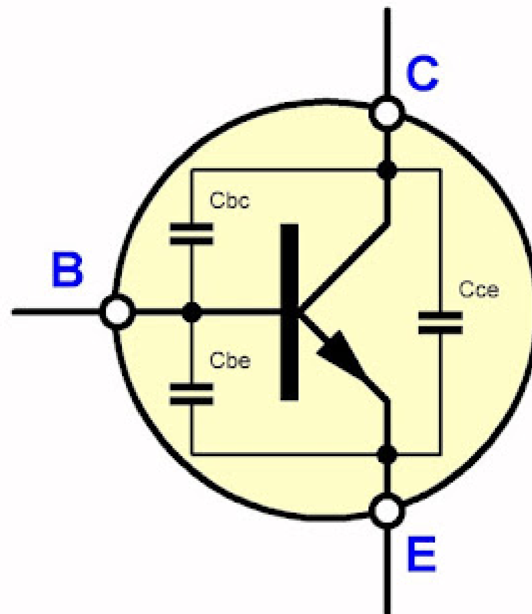
Het meten van de drie lekstromen. (© 2023 Jos Verstraten)

De lekstromen en de temperatuur

Bij moderne silicium klein-signaal transistoren bedraagt de I_{cb0} bij kamertemperatuur slechts enkele nA. De lekstromen zijn echter zeer afhankelijk van de temperatuur. Als de temperatuur van de transistor stijgt, dan zullen de lekstromen ook stijgen. Dit verband is alles behalve lineair, hetgeen betekent dat de stromen flink stijgen als de temperatuur ook maar iets toeneemt. In de praktijk heeft vooral de I_{ce0} daar erg veel last van. Bij temperaturen van 100 °C kan deze parameter oplopen tot meerdere mA.
Ook de I_{eb0} is erg temperatuurgevoelig. Deze lekstroom vloeit tegen de normale basisstroom in. Het gevolg is dat er twee stromen door de basiskring vloeien en dat de lekstroom de reële stuurstroom verlaagt. Dit kan grote gevolgen hebben voor de instelling van de trap. Bij het ontwerpen van transistorschakelingen moet u hiermee rekening houden en maatregelen treffen om de invloed van de lekstromen zo veel mogelijk te onderdrukken.

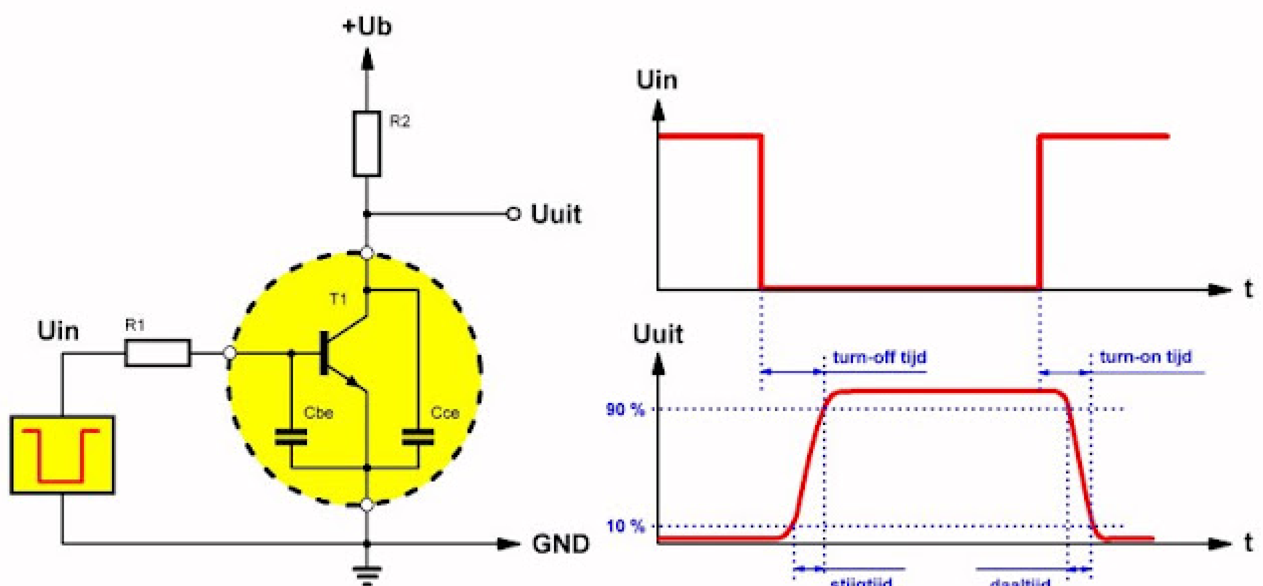
De parasitaire capaciteiten

Door de moderne fabricage-technieken van transistoren zitten de basis-, emitter- en collector-aansluitingen uiteraard heel dicht bij elkaar. Nu is bekend dat tussen twee geleiders die dicht bij elkaar liggen altijd een capaciteit aanwezig is. Dit noemt men een '*parasitaire capaciteit*'.
Een transistor heeft dus drie parasitaire capaciteiten C_{be}, C_{bc} en C_{ce}. Dat zijn vrij kleine condensatoren, in de grootte-orde van pF. De capaciteiten zijn in het interne transistorschema van de onderstaande figuur weergegeven.



De parasitaire capaciteiten in een transistor.
(© 2023 Jos Verstraten)

De schakelkarakteristiek
Als u de transistor gebruikt in laagfrequent toepassingen hebt u van deze capaciteiten weinig last. Anders wordt het als u de transistor in de pulstechniek of in hoogfrequent schakelingen toepast. Zoals bekend mag worden verondersteld zitten er in een puls veel hoge harmonischen. Een mooie blokspanning met een frequentie van 1 kHz bevat signalen tot ongeveer 40 kHz. Als die signalen verzwakt worden, dan zullen de hoeken van de blokspanning worden afgerond en de stijg- en daaltijden groter worden.
Dat is nu precies hetgeen gebeurt als u een transistor gebruikt om een puls te versterken. De hoge harmonischen worden door de parasitaire capaciteiten verzwakt, waardoor de puls vervormd uit de transistor komt. Dit is weergegeven in de onderstaande figuur. Als u een transistorversterker stuurt met een mooie ingangspuls U_{in}, dan zult u vaststellen dat de puls U_{uit} op de uitgang niet alleen vervormd is, maar ook in de tijd vertraagd.
De parasitaire capaciteit C_{be} vormt samen met de basisweerstand R1 een laagdoorlaat filter. Dit verzwakt de hoge harmonischen die in de blokspanning aanwezig zijn. De parasitaire capaciteit C_{ce} belast de uitgang van de transistor en vormt voor de hoge harmonischen een zeer lage weerstand. Ook dit verschijnsel draagt bij aan de slechte pulsweergave.



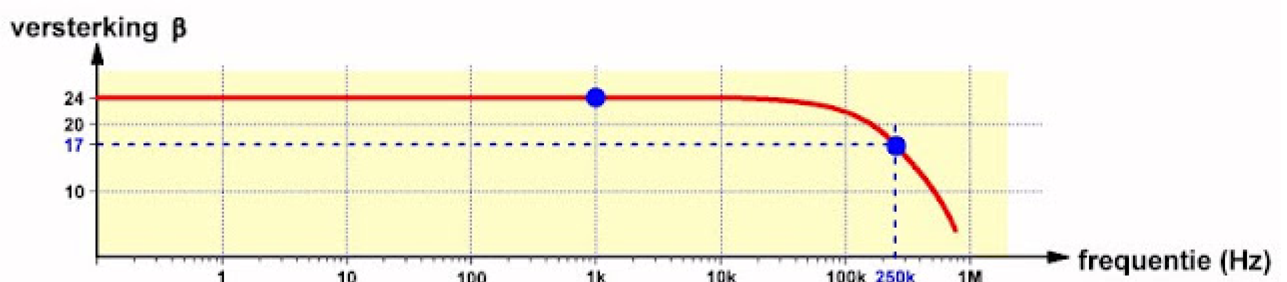
De schakelkarakteristiek van een transistor. (© 2023 Jos Verstraten)

Maar er is nog een heel ander probleem! Als de puls positief is, vloeit er basisstroom in de

transistor. Deze stroom bouwt in de basis-zône van de halfgeleider een bepaalde lading op. Deze lading is verantwoordelijk voor het '*transistor-effect*', waardoor de halfgeleider versterkt. Maar het duurt uiteraard een tijdje alvorens de stroom deze lading heeft opgebouwd. De tijd die verstrijkt tussen het hoog worden van U_{in} en het laag worden van U_{uit} wordt de '*turn-on*' tijd genoemd. Op het moment dat de basisspanning wegvalt, zou de transistor onmiddellijk naar sper moeten gaan en U_{uit} hoog worden. Maar er is nog steeds een behoorlijk grote lading in de basis aanwezig. Deze lading zal de transistor nog een tijdje in geleiding houden. Deze tijd wordt de '*turn-off*' tijd genoemd. Omdat de tijdstippen waarop de uitgangsspanning '*laag*' of '*hoog*' wordt niet exact gedefinieerd kunnen worden, wordt voor het meten van de turn-on en turn-off tijden 10 % en 90 % van de amplitude van het uitgangssignaal gebruikt. De momenten waarop het uitgangssignaal deze spanningswaarden bereikt is namelijk wél exact te meten.

De grensfrequentie

De ingangscapaciteit C_{be} vormt, zoals reeds beschreven, een laagdoorlaat filtertje met de weerstand in de ingangskring. Dit heeft tot gevolg dat de dynamische stroomversterking β niet constant is, maar afhankelijk van de frequentie. Ook dit verschijnsel heeft men onder een wiskundige formulering gevat. Men noemt de '*grensfrequentie*' van een transistor die frequentie, waarbij de dynamische stroomversterking β gedaald is tot een waarde die gelijk is aan 0,707 keer de waarde bij een frequentie van 1 kHz. Grafisch is dit toegelicht in de onderstaande figuur. Waarom die rare factor 0,707? Dat komt overeen met een daling van de uitgangsspanning met 3 dB en deze waarde is ooit afgesproken voor het definiëren van de bandbreedtes en grensfrequenties.
In het getekend voorbeeld bedraagt de dynamische versterking bij 1 kHz 24. 24 maal 0,707 is gelijk aan 17. U kunt nu de β meten bij verschillende frequenties, waaruit blijkt dat deze parameter is gedaald tot 17 bij een frequentie van 250 kHz. Dit noemt men dan de grensfrequentie van de gemeten transistor.



De grafische toelichting van het begrip grensfrequentie. (© 2023 Jos Verstraten)

Het verschijnsel grensfrequentie heeft grote gevolgen op het ontwerp van transistorschakelingen. Door middel van terugkoppelingen moet u proberen de versterkingsfactor kunstmatig te verlagen, zodat de natuurlijke verlaging bij de grensfrequentie gemakkelijk door de terugkoppeling kan worden opgevangen. Zonder dergelijke terugkoppelingen zou een transistor niet in staat zijn signalen met hoge frequenties behoorlijk te versterken.

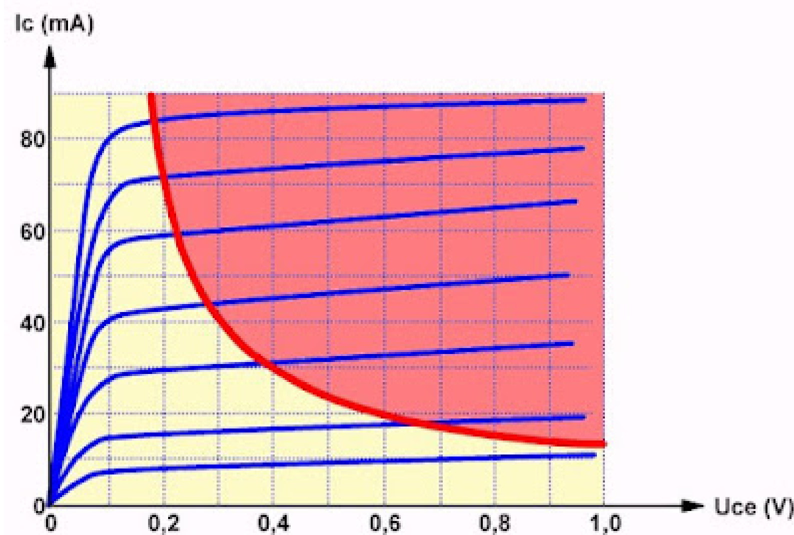
De lijn van maximaal vermogen

Om dit zeer belangrijke begrip nader te verklaren moet u teruggrijpen op de uitgangskarakteristiek van een transistor. Deze geeft het verband tussen de collectorstroom en de collector/emitter-spanning. Nu weet u uit de elektrotechniek dat het product van spanning en stroom gelijk is aan een vermogen. Immers:
$P = U \cdot I$
De uitgangskarakteristiek geeft dus het vermogen dat in de transistor wordt gedissipeerd.
Nu wordt iedere transistor gekenmerkt door drie maximale grootheden:

- De maximale collector/emitter-spanning U_{cemax}
- De maximale collectorstroom I_{cmax}
- Het maximaal vermogen P_{max}

Deze drie maximale gegevens kunnen omgezet worden in een lijn in de uitgangskarakteristiek. Het volstaat om voor iedere waarde van de U_{ce} de stroom I_c te berekenen, waarbij het product van spanning en stroom precies gelijk is aan het maximaal vermogen P_{max}.

Stel dat u te maken hebt met een transistor die een P_{max} heeft van 1.000 mW. Dan kunt u gemakkelijk berekenen dat de maximale stroom I_c bij een spanning van 10 V over de transistor gelijk is aan 100 mA. 100 mA maal 10 V is immers gelijk aan 1.000 mW. Als u dat voor alle spanningen doet en de resultaten in de uitgangskarakteristiek intekent ontstaat een soort cirkelsegment. Dit noemt men '*de lijn van het maximaal vermogen*', getekend in de onderstaande figuur.



De lijn van maximaal vermogen, ingetekend in de uitgangskarakteristiek van een transistor. (© 2023 Jos Verstraten)

De lijn van maximaal vermogen is voorgesteld door de dikke rode lijn. Bij het instellen van een transistortrap moet u er in ieder geval voor zorgen dat het instelpunt van de trap onder de lijn van maximaal vermogen ligt. Het gebied boven de lijn is dus verboden! Overtreedt u deze regel, dan zal het gemiddelde vermogen dat in de transistor wordt gedissipeerd groter zijn dan het maximaal vermogen en zal de transistor overlijden aan oververhitting.